

新幹線地震脱線対策に関する研究開発

～埋込栓施工機械の開発・
伸縮継目撤去の検討～



松本 剛明*



島津 健**



戸矢 真琴*



堀 雄一郎*



小関 昌信*

2004年に発生した新潟県中越地震で営業運転中の新幹線車両が脱線した事故を受け、JR東日本では新幹線地震脱線対策に関する研究開発や施策を進めている。現在までに地震対策用接着絶縁レール、スラブ軌道用レール転倒防止装置を実用化するとともに、伸縮継目の撤去工事を進めている。本稿ではスラブ軌道用レール転倒防止装置設置工事の効率化を図ることを目的とした埋込栓施工機械の開発および伸縮継目の撤去に関する検討について報告する。埋込栓施工機械は、室内試験および営業線での試使用から従来の3倍程度の施工効率となることを確認した。伸縮継目撤去については、新幹線の高架橋を含むスラブ軌道の横抵抗力実測に基づく解析より、伸縮継目が敷設されている最小曲線半径700m以上の最大レール軸力許容値980kNを、1,300kN程度まで許容しても問題ないと推定した。

●キーワード：地震脱線対策、レール転倒防止装置、伸縮継目、ロングレール

1. はじめに

2004年に発生した新潟県中越地震で営業運転中の新幹線車両が脱線した事故を受け、JR東日本では新幹線地震脱線対策に関する研究開発を進めている。このうち、線路設備の地震脱線対策としては以下の開発があげられる。(2012年4月現在の進捗状況)

- (1) 地震対策用接着絶縁レール（敷設完了）
- (2) スラブ軌道用レール転倒防止装置（敷設工事中）
- (3) バラスト軌道用レール転倒防止装置（開発中）
- (4) 伸縮継目撤去（撤去工事中、撤去対象拡大検討中）
- (5) 分岐器区間対策（開発中）

本稿では、スラブ軌道用レール転倒防止装置の設置における埋込栓設置作業の効率化を図ることを目的とした埋込栓施工機械の開発、および伸縮継目撤去対象の拡大を図るための各種検討について報告する。

2. 軌道スラブ用埋込栓施工機械の開発

2.1 概要

スラブ軌道用レール転倒防止装置（図1）を既設の軌道スラブに設置するためには、埋込栓（強化ポリアミド製）を後施工アンカーとして取付ける必要があり、現在は埋込栓取付け工程の大部分を手作業で行っている。埋込栓部の断面イメージを図2に示す。

今回、スラブ軌道へレール転倒防止装置を設置する作業の効率向上およびコストダウンを図ることを目的として、埋込栓取付け時に固着材として用いている合成樹脂材料の混合および注入が可能な施工機械を開発した。



図1 レール転倒防止装置

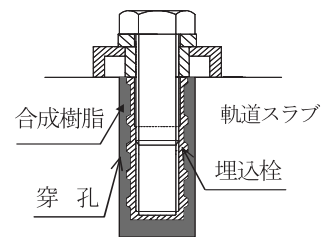


図2 埋込栓断面イメージ

2.2 埋込栓施工機械の開発

軌道スラブにレール転倒防止装置を設置する手順は図3に示すとおりである。

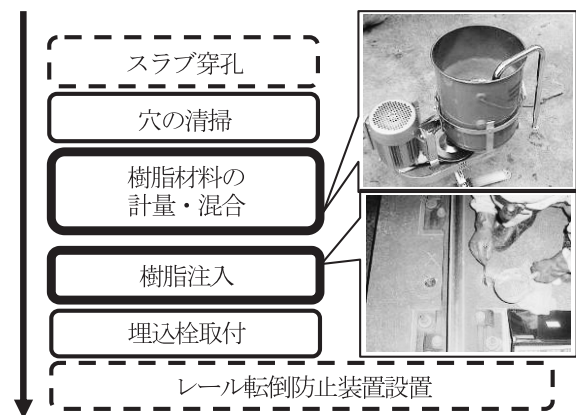


図3 現在のレール転倒防止装置設置手順

このうちスラブ穿孔については、施工会社を主体として複数穴同時穿孔を可能とするなどの機械開発が進められている。その一方で穿孔穴に埋込栓を設置する作業は固着材として用いる合成樹脂の混合を含めて主に手作業で実施している。そこで、本開発では、埋込栓を穿孔穴に固着させる

合成樹脂（充填材）の計量・混合および注入作業の効率を2倍以上とすることを目標とした。

2.2.1 機械化に適合した合成樹脂の選定

従来、レール転倒防止装置用埋込栓の設置に使用してきた合成樹脂は主剤・硬化剤・骨材から成る3種材料であった。樹脂の混合・注入を機械化するにあたっては混合後の均一性および攪拌部の摩損防止を図るため骨材を含まない2種材料を選定することとした。また、対象とする温度範囲は当社のエリアに鑑み、-10℃～30℃としている。施工機械の開発にあたっては、合成樹脂材料の特性を考慮し、施工時の温度によって2種類の合成樹脂を使い分けることとした。選定した合成樹脂の概要を表1に示す。

表1 選定した樹脂の概要

項目	常温用樹脂	低温用樹脂	
使用温度域	5℃～30℃	-10℃～5℃	
概要	エポキシ系樹脂	不飽和ポリエステル系樹脂	
可使時間	20分以上	15分以上	
粘度	主剤	70,000mPa・s	9,750mPa・s
	硬化剤	200mPa・s	13,600mPa・s
	混合物	12,880mPa・s	10,500mPa・s
記事	粘度は20℃時	粘度は-10℃時	

2.2.2 埋込栓施工機械

従来、3種材料の樹脂を混合する際には、主剤、硬化剤、骨材を計量してバッチ混合していたが、合成樹脂の可使時間（作業可能な粘度を維持する時間）の制約がある上、混合した合成樹脂をその都度別容器に移し替える必要があった。そこで、施工機械は、以下の方針で開発した。開発した施工機械を図4に示す。

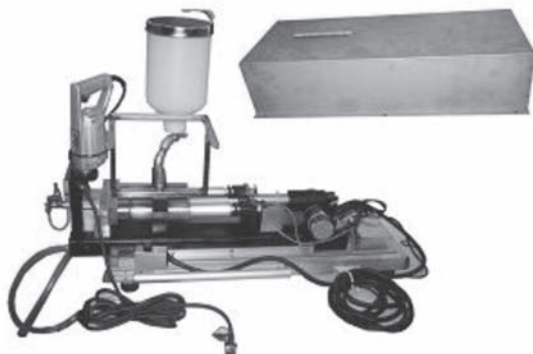


図4 開発した施工機械

(1) 計量

主剤および硬化剤を圧送することができるポンプを使用し、シリンダー径を混合比率とすることで計量が不要な構造とする。

(2) 混合

可使時間を考慮し、レール転倒防止装置用埋込栓1穴注入分（約180cc）ごとに混合する。

(3) 注入

機械の動作は、ピストンの前進・後退および、混合部の攪拌装置の回転のみとする。

2.3 性能確認試験

開発した機械の性能を確認するため、室内試験および営業線工事における施工性確認を実施した。

2.3.1 室内性能確認試験

試作した施工機械を用いて主剤および硬化剤を混合した場合、所定の品質が確保できているかを確認するための室内試験を実施した。室内試験では施工機械により混合した合成樹脂について以下の試験を実施した。

- ・圧縮強度試験（混合状態を確認）
- ・引抜耐力試験（埋込栓の引抜耐力確認）

なお、試験にあたっては大型環境試験室により常温用樹脂は20℃、低温用樹脂は-10℃の環境下でそれぞれ72時間養生した後に各試験を実施した。

施工機械による混合の均一性を確認するため、硬化後の合成樹脂の圧縮強度を確認した。試験結果を表2に示す。表2より、常温用・低温用ともに均一かつ十分（スラブコンクリートの圧縮強度は40N/mm²）な圧縮強度を有しており、施工機械による合成樹脂混合が良好に実施できることを確認した。

表2 圧縮強度試験結果

バッチ no.	常温用圧縮強度		低温用圧縮強度	
	平均値 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	平均値 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)
1	78.5	0.5	110.6	5.0
2	80.4	0.4	117.4	3.2
3	81.3	2.6	120.9	3.0
4	81.9	0.3	122.0	2.7
5	82.2	1.0	120.5	3.4

次に、施工機械を用いて施工した埋込栓の引抜耐力を確認するため、あらかじめ所定の寸法の穴を穿孔した軌道スラブに対して施工機械を用いて合成樹脂を注入し、埋込栓を固着させ、引抜耐力を確認した。試験条件は次の二通りである。

- ①常温用樹脂（20℃で施工・養生）
- ②低温用樹脂（-10℃で施工・養生）

引抜耐力試験状況を図5に、引抜試験結果の一例を図6に示す。試験にて引抜耐力を確認した結果、常温用樹脂および低温用樹脂のいずれについても引抜時の破壊形態はコ

ンクリートのコーン破壊であり、埋込栓がコンクリートに確実に固着されていることを示す結果であった。



図5 引抜試験状況

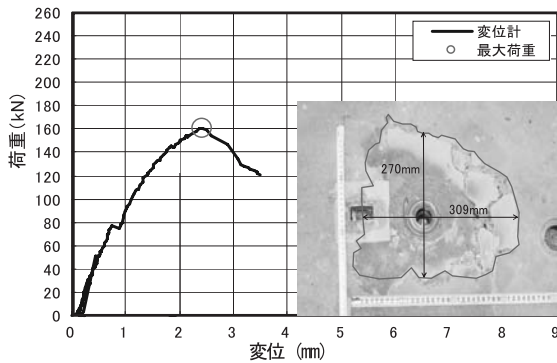


図6 引抜耐力試験結果の一例

2.3.2 実験線軌道における施工試験

室内試験にて機械を用いて施工した樹脂の品質を確認することができたため、施工効率を確認するためにJR東日本研究開発センター内の実験線軌道（図7）にて施工試験（試験延長30m）を実施した。実際の施工を再現するため、事前に軌道スラブのレール転倒防止装置設置位置を穿孔し、施工試験においては穿孔穴の清掃、樹脂の混合・注入、埋込栓の取付を実施した。施工試験の様子を図8に示す。

施工試験の結果から、樹脂の混合・注入および埋込栓取付の施工効率を3倍程度に向上することが可能であると試算した。

2.3.3 営業線工事における施工性確認

続いて1回の作業における施工効率を確認するため営業線におけるレール転倒防止装置用埋込栓設置工事（施工延長120m）に施工機械を使用した。その結果、試験線における結果同様に、1回あたりの施工数量が手作業の約3倍となる見通しを得た。



図7 実験線軌道



図8 施工試験状況

3. 新幹線の伸縮継目撤去の検討

3.1 目的

高架橋上のスラブ軌道では、温度変化に伴うレールと橋桁の伸縮挙動の違いによりレールの長手方向に作用する力（以下、軸力という）が不均衡となり、桁の支承配置などによってはロングレールの軸力が過大になることがある。そのため、伸縮継目を配置して軸力を低減している。

地震対策の一環として、伸縮継目の構造対策の検討を行った結果、大規模な改良が必要であると判明しており、対策の実用化の難易度の観点からも伸縮継目を不要とすることが技術的に可能か検討が望まれている。また、伸縮継目の構造は複雑であり、軌道管理や材料管理の点でメンテナンスに労力を要している。

そこで、JR東日本管内の新幹線において伸縮継目を撤去することを目的に橋上ロングレールの応力計算や撤去するためのレール軸力が0となる温度条件（以下、設定温度という）、レール軸力、レール破断時開口量の許容値の拡大などの検討を行った。

3.2 伸縮継目撤去の検討

対象とする伸縮継目は275台について検討を行った。伸縮継目撤去の検討概要を図9に示す。

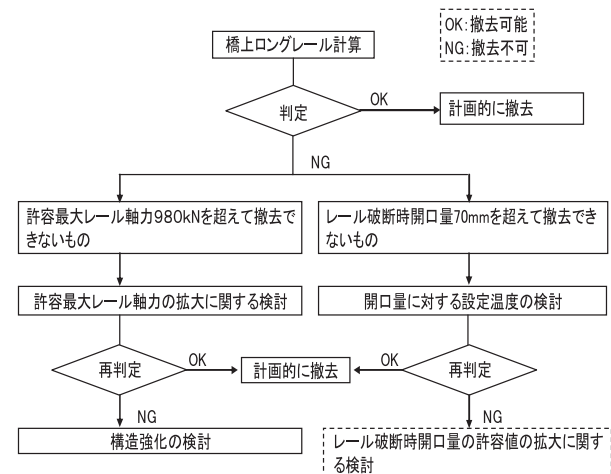


図9 伸縮継目撤去の検討フロー

3.3 橋上ロングレールの計算

伸縮継目を撤去する目的に、現行のロングレール管理手法に基づき伸縮継目を撤去した場合の最大レール軸力、レール破断時開口量を計算した。

その結果、伸縮継目が現行撤去可能であると算出された伸縮継目197台については、順次撤去工事を行っている。

一方、撤去不可能と判断された伸縮継目については、後述の検討を行い伸縮継目を撤去できる条件等を提案した。

3.4 最大レール軸力の検討

伸縮継目撤去不可能の原因の1つである最大レール軸力の許容値980kNを越えているものについて、2つの対策の検討を行った。

(1) 最大レール軸力の許容値の拡大に関する検討

最大レール軸力の許容値である980kNは、バラスト軌道の座屈安全性から算出された値（以下、横抵抗力とする。）を準用したものである。そのため、バラスト軌道よりも座屈抵抗性の大きいスラブ軌道においては、座屈安全性の評価基準の合理性について課題が残されていた。

そこで、スラブ軌道の最大レール軸力の許容値を求めるために、JR東日本研究開発センター内の実験線スラブ軌道において、横抵抗力試験（図10）を実施しタイププレート、軌道スラブ、突起部等の特性を評価した。



図10 横抵抗力試験

この試験結果を基に有限要素法によるスラブ軌道の構造解析を行った。解析結果を図11に示す。レール軸力1,500kNの解析では、レール横方向変位は小さく、レール締結装置および突起部への作用力は許容値50kN以下であり余裕がある。しかし、レール軸力増加による軌道変位進みへの影響、ふく進による軸力の付加および締結装置、突起の経年劣化などを考慮し、曲線半径700m以上におけるスラブ軌道の許容最大レール軸力として、1,300kN程度までは許容しても問題ないと判断した。

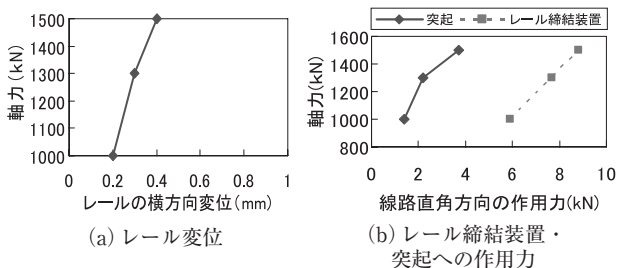


図11 曲線半径700mの解析結果

(2) スラブ軌道の横抵抗力増強策の考案

(1) で述べた検討により、最大レール軸力の許容値は1,300kN程度まで拡大が図れるが、それ以上のレール軸力が発生する箇所の対策として横抵抗力増強策を考案した。

考案したスラブ軌道の横抵抗力増強策を図12、13に示す。この増強策に対して、JR東日本研究開発センター内の実験線スラブ軌道において性能確認試験を実施した。その結果、

増強策をスラブ軌道片側に2個取り付けることによってレール軸力換算にして1,750kN程度までの座屈抵抗性があると算出された。よって、本増強策により、レール軸力1,750kN程度までは座屈を起こさないと推定できる。なお、この増強策は路盤コンクリートが有る場合（図12）とない場合（図13）の2種類を開発した。また、取り付けの個数を増やすことによりさらに大きなレール軸力にも耐え得ると考えられる。



図12 増強策①
(インサート孔部取付)



図13 増強策②
(路盤コンクリートがない場合)

3.5 レール破断時開口量の検討

伸縮継目を撤去不可能な原因の1つであるレール破断時開口量の許容値70mmを越えているものについて、2つの対策の検討を行った。

(1) レール破断時開口量70mm未満になる設定温度の検討

レール破断時開口量が70mm未満になるよう、設定温度条件の検討を行った。その結果、すべての伸縮継目を撤去可能とする、最も低い設定温度は現行の設定温度20～30℃から13℃低い、設定温度7～17℃となり、最大レール軸力は1,591kNとなった。しかし、設定温度の変更については、メンテナンス上の課題があるため今後更なる検討が必要である。

(2) レール破断時開口量の許容値の拡大に関する検討

レール破断時開口量の許容値70mmの拡大に向けて、有限要素法および梁モデルによる静的および動的解析などにより、レール破断時の上下左右方向の食い違い量などの検討中である。

3.6 伸縮継目撤去に関する今後の方針

対象としている伸縮継目275台中197台が撤去可能と判断した。また、撤去不可能なものについては、レール破断時開口量の許容値拡大の結果により再度検討を行い、対象としているすべての伸縮継目撤去を可能とすることをめざす。

参考文献

- 1) 手代木卓也、小西俊之、野本耕一、若月修：新幹線地震脱線対策の開発、第16回鉄道技術連合シンポジウム、pp.515-518,2009.
- 2) 松本剛明、堀雄一郎、村上祐治、久修：軌道スラブへの埋込栓設置方法に関する検討、第18回鉄道技術連合シンポジウム、pp.91-94,2011.
- 3) 島津健、手代木卓也、堀雄一郎、片岡宏夫、西宮裕騎：高架橋上における伸縮継目撤去に関する研究、第15回鉄道工学シンポジウム、pp.108-111,2011.